

文章编号:1007-2780(2017)05-0380-07

结合图像分割的改进导引滤波

王健博¹, 杨 航^{2*}, 吴笑天²

(1. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

(2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 图像部, 吉林 长春 130033)

摘要:为了更好地对图像进行平滑同时保持边缘不模糊,设计一种新的滤波方法。对基于该方法的图像滤波、细节增强等算法进行研究。首先,根据图像的亮度和颜色对图像进行分割,将图像分成不同的区域。接着,在不同的区域进行导引滤波,得到互不交叠的多个滤波子图像。然后,将这些子图融合,得到基于分割的改进导引滤波结果。最后,利用提出的改进导引滤波方法提出一种多尺度的细节增强方法。实验结果表明,在图像平滑和细节增强方面,提出的方法都要好于传统的导引滤波;提出的方法不仅能较好的光滑图像,同时保持边缘清晰,减少了传统滤波方法在边缘处的光晕现象。

关键词: 图像分割;导引滤波;细节增强;边缘保持

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173205.0380

Segmentation based improved guided filter

WANG Jian-bo¹, YANG Hang^{2*}, Wu Xiao-tian²

(1. *Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China*)

(2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China*)

Abstract: In order to smooth image detail and preserve edge information well, a new edge-preserving filter is proposed in this paper. The filtering and detail enhancement method based on the proposed filter is studied. First, based on image intensity and color, the mean shift method is used for image segmentation, and we obtain several areas. Second, the guided image filter is used for each area, and several filtered images are separated with each other. Third, we fuse these filtered images to obtain a final result. Finally, a multi-scale detail enhancement method based on improved guided filter is proposed. Experimental results indicate that the proposed filter approach can obtain edge-preserving smoothed image, and detail enhanced image with less hole than guided filter. The proposed filter can obtain better results than guided filter in smoothing and detail enhancement.

Key words: image segmentation; guided filter; edge-preserving; detail enhancement

收稿日期:2016-10-10;修订日期:2016-12-26.

基金项目:国家自然科学基金(No.61401425)

Supported by National Natural Science Foundation(No.61401425)

* 通信联系人, E-mail: yhang3109@163.com

1 引言

滤波是图像处理和视频处理中最为重要的一种算子,而边缘保持光滑方法更是许多实际应用的基础,并且获得了学者们在过去20年来持续的关注。边缘保持滤波器可以有很多的应用,例如,图像平滑^[1]、图像细节增强^[2]、视频去雾^[3],图像色调映射^[4]、以及图像融合^[5]等方面。图像平滑的目的在于滤除图像中细节部分而保持图像边缘清晰。然而,对多数平滑算法来说,在去除细节的同时边缘也被模糊。所以,如何在平滑细节和保持边缘之间达到平衡成为图像平滑保边滤波器的难题。

边缘保持滤波器可以由加权滤波方法得到,最具代表性的有双边滤波^[6]、非局部均值滤波^[7]以及域变换滤波方法^[8]等等,另外边缘保持的效果也可以由基于最优化的方法达到,例如L0全变差方法^[9]、局部拉普拉斯滤波^[10]等,

双边滤波^[6]是最早提出的一种边缘保持滤波器,同时也是受关注最多的方法。因为其简单而有效,它被广泛地应用到各个图像、视频处理领域。该算法是一种典型的非线性加权滤波算法,其权重是由空域相似性和灰度相似性来共同确定,滤波后得到平滑图像,能够在滤除图像细节的同时很好地保持图像边缘特征。但其缺点是在滤波后的图像边缘上容易产生光晕现象。

总变分(TV)^[11]实质上是一种各向异性扩散方法,它是一种无约束的优化模型,能在去噪的同时很好地保持图像的边缘,但该方法应用于图像平滑处理中,会引入阶梯效应,同时容易将噪声当成边缘,使恢复的图像产生虚假边缘。基于L0全变差^[9]的方法是最优化手段的代表,其将全变差的L0范数作为正则化项,提出了一种快速求解这种优化问题的方法。该方法能够得到具有平滑结构的图像,同时很好地保持边缘清晰。虽然该模型比总变差更有效率,然而会引入更严重的阶梯效应。

导引滤波^[12]是一种新颖的边缘保持平滑滤波器,也是目前为止最快速的滤波器之一,广泛的应用在图像处理的各个领域^[13]。它既可以有效地平滑背景和保持场景的边缘细节,同时不会产生引导反转效应。但导引滤波是非线性加权滤

波的一种,因此不可避免的会有光晕现象。

本文是在导引滤波的基础上,为了尽量减少光晕效应,提出了一种基于图像分割的改进导引滤波方法。光晕是由于在图像位于边缘的像素,当投影到背景场景中时,背景和前景边缘的像素进行交集运算,产生的一个模糊宽带。为了避免前景与背景像素的混叠运算,我们首先使用图像分割的方法将图像分割成多个区域,然后在每个区域上独自进行导引滤波得到多个子图,最后再将各个子图融合成一幅最终滤波图像。这样做的优点是可以有效地在图像边缘处避免于背景像素进行运算,得到更加清晰的边缘。本文也将改进的导引滤波应用到图像细节增强中,提出一种多尺度自适应增强方法。实验表明,基于图像分割的改进导引滤波方法可以得到具有高质量视觉效果

2 导引滤波简介

导引滤波^[12]是一种快速的边缘保持滤波器,它包括滤波输入图像 u_p ,导引图像 u_I 以及输出图像 u ,其中 u_p 和 u_I 可以是相同的。导引滤波的基本假设:在一个二维窗口内,滤波输出图像 u 和导引图像 u_I 满足线性关系,

$$u(i) = a_k u_I(i) + b_k, \quad (1)$$

其中 (a_k, b_k) 表示在窗口 w_k 内的线性组合系数,可以由公式(2)、(3)计算得到:

$$a_k = \frac{\sum_{i \in w_k} u_I(i) u_p(i) - \mu_k q_k}{w^2 (\sigma_k^2 + \epsilon)}, \quad (2)$$

$$b_k = q_k - a_k \mu_k, \quad (3)$$

其中: μ_k 和 σ_k^2 是 u_I 在窗口 w_k 内的均值和方差, q_k 则是 u_p 在窗口 w_k 内的均值。

但是,由于多个窗口 w_k 都会包含像素 i ,所以对于固定的像素 i ,具有多个线性组合系数,为了避免这种现象,一种简单的方法就是将这些值进行平均,因此我们得到最终导引滤波的公式:

$$u(i) = \bar{a}_i u_I(i) + \bar{b}_i, \quad (4)$$

其中: $\bar{a}_i = \frac{1}{w^2} \sum_{k \in w_k} a_k, \bar{b}_i = \frac{1}{w^2} \sum_{k \in w_k} b_k$ 。

更多的细节可以参考文献[12]。

在本文中,我们记导引滤波,即公式(4)为

$$u = \text{guidfilter}(u_I, u_p), \quad (5)$$

导引滤波既可以有效地平滑细节和保持场景边缘清晰,同时不会产生梯度翻转效应。可以发现,输出图像也有类似导引图像的梯度,即 $\nabla u \approx_a \nabla u_I$,这也正是导引滤波有保持边缘特性的原因。

3 基于图像分割的导引滤波

3.1 Mean shift 分割

图像分割就是求每一个像素点的类标号。类标号取决于它在特征空间所属的类。对于每一个类,都有类中心,它深深地吸引着一些点,就形成了一个类,即类中心对类中的点构成一个吸引域。如此,图像分割问题,就可以看成对每个像素点,找它的类中心问题,因为找到类中心就知道它是属于那一类,即类中心一样的点就是一类。

Mean shift^[14]是一种基于特征空间的分割方法,其核心有两点,密度估计(Density Estimation)和模型搜索。对于图像数据,其分布无固定模式可循,所以密度估计须用非参数估计,选用的是具有平滑效果的核密度估计。基于 Mean shift 方法的图像分割分三步走:模点搜索/图像平滑、模点聚类/合并相似区域、兼并小区域(可选)。模点搜索是为了找到每个数据点的到类中心,以中心的颜色代替自己的颜色,从而平滑图像。但模点搜索得到的模点太多,并且很多模点挨得很近,若果将每个模点都作为一类的话,类别太多,容易产生过分割,即分割太细,所以要合并

掉一些模点,也就是合并相似区域。模点聚类后所得到的分割区域中,有些区域所包含的像素点太少,这些小区域也不是我们想要的,需要再次合并。

这样,图像可以被很好地分成多个区域,图 1 中显示了 Mean shift 分割效果图,不同区域用不同颜色标识。



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 分割后的图像,各个区域用不同颜色标示

(b) Segmentation image

图 1 Mean shift 分割效果

Fig.1 Segmentation result of mean shift method

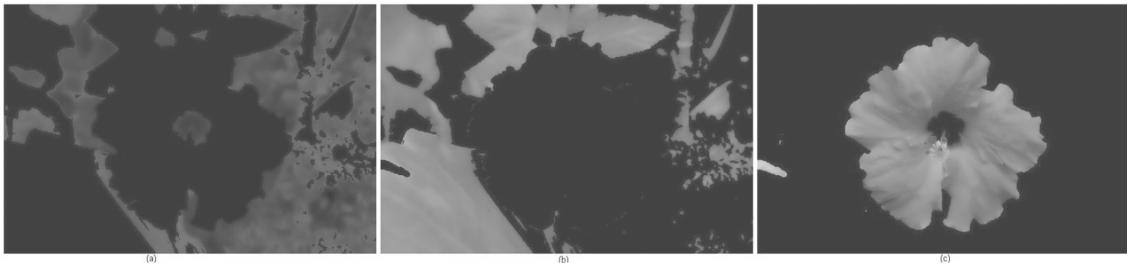


图 2 分割图像各个区域的导引滤波

Fig.2 Results of guided filter for each segmentation area

3.2 基于图像分割的导引滤波

假设导引图像 u_I 经过 Mean shift 分割成为 n 个区域 $\Omega_k, k=1, \dots, n$, 令 $M_k, k=1, \dots, n$ 表示每个区域的标示矩阵,其定义为:

$$M_k(i, j) = \begin{cases} 1, (i, j) \in \Omega_k \\ 0, (i, j) \notin \Omega_k \end{cases}, \quad (6)$$

在我们的算法中,为了能够对图像中某一像素进行滤波,往往依靠其周围邻域的像素点的相似性。为了能够更好地保持图像的边缘,本文采用一种硬边缘策略,即仅在分割区域 Ω_k 内进行导引滤波,使得区域外的像素无法参加运算:

$$u_k = \text{guidfilter}(M_k \cdot u_I, M_k \cdot u_p), \quad (7)$$

得到多个 $u_k, k=1, \dots, n$ 后,再将其汇集成一幅图像,即:

$$u = \sum_k M_k \cdot u_k, \quad (8)$$

我们记这种基于分割的导引滤波为

$$u = \text{MSguidefilter}(u_I, u_p), \quad (9)$$

在双边滤波和导引滤波中,光滑图像使用的是空间位置和像素值的相似性,这被称之为软边缘限制^[15],为了能够更好地保持边缘,我们提出了这种硬边缘限制,即通过分割的方法,将不同结构的物体区分开,在不同结构体的交界处(往往就是图像的边缘处)滤波时,彼此之间不交叉运算,因此可以保证各个结构内部运算的高度独立性。这样可以有效的减少滤波后出现的光晕现象。

图2给出了这种基于分割的导引滤波方法中每个区域的滤波效果图。

3.3 基于改进导引滤波的图像增强方法

本文提出了一种多尺度的细节增强方法,主要是利用了改进导引滤波的保边缘平滑性质,构造了一个平滑图像和一组细节图像,然后在每个细节图像上对其进行能量放大,最后再将能量放大后的细节图和平滑图整合,得到增强后的图像。具体方法如下:

(1)对待增强图像 u_{orig} 进行 L 级多尺度改进的导引滤波分解,得到一个平滑图像和多个细节图像:

$$u_{\text{smooth}}^{t+1} = \text{MSguidefilter}(u_{\text{smooth}}^t, u_{\text{smooth}}^t), \quad (10)$$

$$u_{\text{detail}}^{t+1} = u_{\text{smooth}}^t - u_{\text{smooth}}^{t+1}, \quad (11)$$

其中, $u_{\text{smooth}}^0 = u_{\text{orig}}, t=0, \dots, L$ 。

(2)对细节图像 $u_{\text{detail}}^{t+1}, t=0, \dots, L-1$ 进行能量增强,我们采用文献[16]中非线性增强方法,

通过对一种自适应增强变换,对细节图像的能量进行放大,同时抑制噪声。具体公式如下:

$$u_{\text{detail}}^{t+1} = f(u_{\text{detail}}^{t+1}), \quad (12)$$

其中:

$$f(x) = a [\text{sigm}(c(x-b)) - \text{sigm}(-c(x+b))], \quad (13)$$

其中 $a = \frac{1}{\text{sigm}(c(1-b)) - \text{sigm}(-c(1+b))}$,

$$0 < b < 1, \text{sigm}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

b 和 c 用来控制增强的幅度。从图3可以看出,

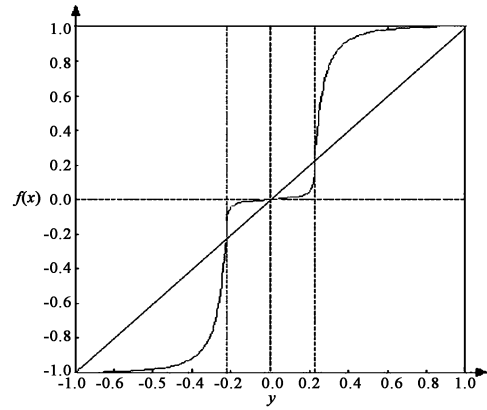


图3 变换函数 $f(x)$ 图示,其中 $b=0.25, c=40$

Fig.3 Plot of transform function $f(x)$ when $b = 0.25$ and $c = 40$

函数主要增强了灰度值的中间部分,因为较低的值对应噪声,而较高的值对应边缘/纹理细节。

(3)重构图像。将增强后的细节图像和平滑图像相加,得到最终的细节增强图像:

$$u_{\text{enhance}} = u_{\text{smooth}}^L + \sum_{t=1}^L u_{\text{smooth}}^t. \quad (14)$$

4 实验与结果

为了验证本文提出的改进导引滤波方法与提出的多尺度细节增强算法的有效性和优越性,将其与双边滤波^[6]和导引滤波^[12]及其增强算法进行对比实验。同时本文采用图像熵的方法给出定量的指标作为对比,图像熵越大,表明图像越清晰,质量越好。

4.1 图像滤波实验

第一组实验是对“紫花”图像的滤波对比。图4中给出了双边滤波、导引滤波和本文方法的处理效果对比图。子图(a)是原始图像,子图(b)是双边滤波的效果,其灰度熵为1.38,子图(c)是导引滤波效果,其灰度熵为1.40,子图(d)是本文的滤波效果,灰度熵为1.46。从图像的对比可以看出,在花瓣边缘处,导引滤波的效果有一定程度的模糊,而本文的方法在边缘处依然清晰。同时在结构内,例如花瓣内部,一些细节已经被滤除,达到了和导引滤波同等的效果。

图5给出了在“鸚鵡”图像上进行的对比实验。在标注的红色矩形框中,子图(b)和子图(c)与子图(d)有着一定的差别,本文的方法((d)图)

更好的保持了边缘处的清晰度,同时也能很好地滤除图像中的细节和噪声,而其灰度熵分别为

1.85,1.90,1.94,从这些数据上可以看出,本文的方法也是较高的。



图 4 “紫花”滤波效果对比图

Fig.4 Comparison results on“Purple flower”

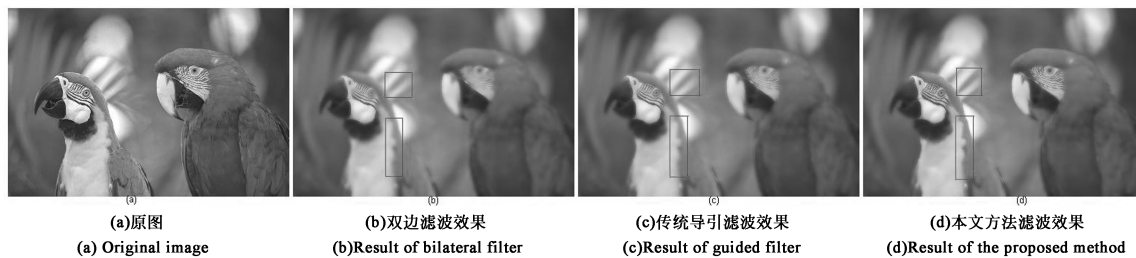


图 5 “鹦鹉”滤波效果对比图

Fig.5 Comparison results on“Parrots”

4.2 图像细节增强实验

在本文的增强实验中,基于双边滤波的增强方法、基于传统的导引滤波的增强方法和基于改进导引滤波的增强方法均采用本文 3.3 节提出的多尺度自适应增强手段。其中分解级数 L 设置为 3,增强函数中 $b=0.25, c=40$ 。

图 6 显示了本文的方法与传统导引滤波的增强效果对比。在图 6 的蓝色矩形框中,可以看出,双边滤波的增强图像(子图(b))和导引滤波的增强图像(子图(c))有明显的光晕现象,他们的灰度熵分别为 13.07 和 13.63,而本文的方法(子图(d))则大大减少了光晕,同时也增强了花瓣的纹路细节,其灰度熵为 13.88,也是较高的。

“飞机”图像的局部增强对比图显示在图 7 中。其中子图(b)是基于双边滤波的增强效果,其灰度熵为 10.54,子图(c)是基于导引滤波的增强效果,灰度熵为 10.82,而子图(d)是基于本文改进导引滤波的增强效果,灰度熵为 11.20。可以看出,在图像的大部分区域,3 张子图是很

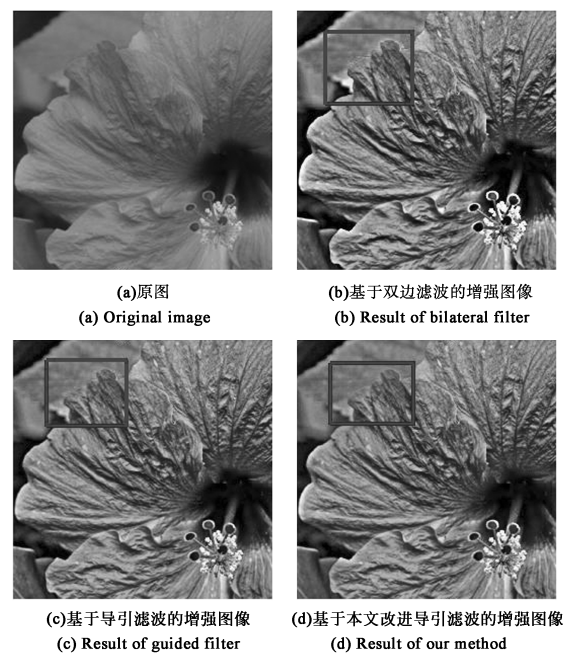


图 6 “红花”图像细节增强图

Fig.6 Enhancement results on“red flower”

相似的,但在图像的边缘处,例如两张子图的蓝色框中,基于双边滤波和导引滤波的增强效果(子图(b)和子图(c))有明显的光晕现象,而

本文的方法(子图(d))在边缘处有极少的光晕,同时对结构内的细节也有很好的增强效果。

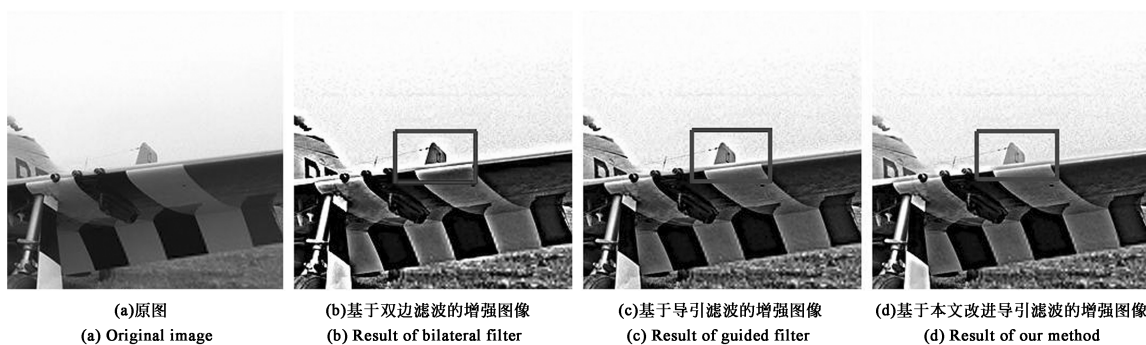


图7 “飞机”图像细节增强图.

Fig.7 The enhancement results on “plane”.

5 结 论

本文根据图像分割方法,将图像分割多个独立互不交叠的区域,然后在各个区域上进行导引滤波,得到了一个导引滤波的改进方法,不仅保持了传统导引滤波好的性质,同时也减少了传统方法的光晕现象。本文也提出了一种基

于改进导引滤波的图像细节增强方法,通过多尺度分解,将原图像分解成一个光滑图像和多个细节图像,然后对细节图像进行能量放大,最后整合成一幅增强图像。实验结果证明:通过改进的导引滤波的图像依然很好地保持边缘的清晰,同时光滑掉图像中的细节。在细节增强试验中,可以明显看出本文的方法有效地减少了图像的光晕现象。

参考文献:

- [1] 芮杰,吴冰,秦志远,等.一种稳健的自适应图像平滑算法[J].中国图象图形学报,2005,10(1):54-58.
RUI J, WU B, QIN Z Y, et al. A robust adaptive image smoothing algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(1): 54-58. (in Chinese)
- [2] 贾宏光,吴泽鹏,朱明超,等.基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强[J].光学精密工程,2013,21(12):3272-3282.
JIA H G, WU Z P, ZHU M C, et al. Infrared image enhancement based on generalized linear operation and bilateral filter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3272-3282. (in Chinese)
- [3] 刘海波,杨杰,吴正平,等.改进的基于雾气理论的视频去雾[J].光学精密工程,2016,24(7):1789-1798.
LIU H B, YANG J, WU Z P, et al. Improved video defogging based on fog theory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1789-1798. (in Chinese)
- [4] 欧海燕,郭太良,姚剑敏,等.基于分层色调映射的LED背光调制算法[J].液晶与显示,2011,26(2):246-249.
OU H Y, GUO T L, YAO J M, et al. Modulation of LED backlight based on hierarchical tone mapping algorithm[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 246-249. (in Chinese)
- [5] 谷雨,刘晶红,孙明超,等.基于分形特征和导引滤波的可见光与红外图像融合算法[J].光电工程,2015,42(4):62-67.
GU Y, LIU J H, SUN M C, et al. Visible and infrared image fusion algorithm by fractal feature and guided filtering[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(4): 62-67. (in Chinese)
- [6] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//*Proceedings of the Sixth Interna-*

- tional Conference on Computer Vision. Bombay: IEEE, 1998: 839-846.
- [7] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//*Proceedings of 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005, 2: 60-65.
- [8] GASTAL E S L, OLIVEIRA M M. Domain transform for edge-aware image and video processing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): Article No. 69.
- [9] XU L, LU C W, XU Y, et al. Image smoothing via L_0 gradient minimization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): Article No. 174.
- [10] PARIS S, HASINOFF S W, KAUTZ J. Local Laplacian filters: edge-aware image processing with a Laplacian pyramid[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): Article No. 68.
- [11] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1/4): 259-268.
- [12] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [13] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [14] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 603-619.
- [15] ZHOU Q, CHEN S F, LIU J Z, et al. Edge-preserving single image super-resolution[C]//*Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimedia*. New York, NY, USA: ACM, 2011: 1037-1040.
- [16] ZHANG Z B, MA S L, HAN X. Multiscale feature extraction of finger-vein patterns based on curvelets and local interconnection structure neural network[C]//*Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. Hong Kong: IEEE, 2006, 4: 145-148.

作者简介:王健博(1984—),男,吉林白山人,博士,工程师,主要从事嵌入式系统、目标跟踪及图像处理研究。E-mail: mypostwww@163.com

杨航(1985—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事图像复原、图像增强等方面的研究。E-mail: yhang3109@163.com